第40卷 第8期
2023年8月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 40 No. 8
Aug. 2023

人类活动对额尔齐斯河流域碳储量的影响

张晓敏[1,2]， 张东梅[1]， 张 伟[1]

（1. 中国科学院西北生态环境资源研究院，冰冻圈科学国家重点实验室，甘肃 兰州 730000；
2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：基于阿尔泰山额尔齐斯河流域2000—2020年土地利用数据，运用InVEST模型，模拟并分析了不同时期该流域碳储量空间分布，并探讨了人类活动对碳储量空间分布的影响。研究表明：（1）流域内土地利用类型以草地和未利用地为主，2000—2020年土地利用格局发生明显改变，耕地和城乡、工矿、居民用地分别增加2619.35 km^2和186.68 km^2；草地和水域分别增加4725.13 km^2和33.47 km^2；林地和未利用地分别减少2328.88 km^2和5237.76 km^2。（2）研究期间，流域内碳储量空间分布格局较为相似且呈现带状分布，高值区分布在高海拔地区，低值区分布在低海拔地区，2000年、2005年、2010年、2015年和2020年流域内碳储量总量分别为641.60 Tg、645.78 Tg、646.83 Tg、650.28 Tg和665.91 Tg，其年增长率为0.95%，呈现上升趋势。（3）流域内碳储量减少或增加的区域呈现点状分布，2000—2020年碳储量的增加量大于减少量，因此，额尔齐斯河流域的固碳能力呈上升趋势。

关键词：人类活动；碳储量；LUCC；InVEST模型；额尔齐斯河流域

为了控制气候变化，实现中国的可持续发展，因此，我国中央经济工作会议明确将“做好碳达峰、碳中和工作”列为2021年重点任务之一[1]。陆地生态系统的固碳能力将直接影响全球碳排放和气候变化进程，减缓大气中CO_2含量途径之一即为提高陆地生态系统碳储量，这一研究热点被世界各地政府以及学者关注[2-6]。人类活动通过改变土地利用的方式，继而改变陆地生态系统的固碳能力，成为总碳储量变化的重要因素[7]。已有结果表明，不同尺度下，影响全球陆地生态系统碳循环的方式不同，在全球尺度，大规模森林砍伐是导致全球总碳储量下降的主要原因；在国家和区域尺度，耕地转为建筑用地将减少总碳储量以及退耕还林还草和植树造林等计划将增加总碳储量，这两个土地利用转移方式是影响总碳储量变化的关键因素[8-10]。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC)第六次评估报告发布《气候变化与土地特别报告》指出，土地利用的碳排放占人类温室气体排放量的23%，这说明人类活动直接影响土地利用变化，继而影响全球陆地生态系统的碳循环[11]。

目前，大量学者针对陆地生态系统固碳功能等方面进行了大量研究，因此，碳储量估算方法应用十分成熟。土壤和植被生物量碳储量的估算方法，主要包括样地调查、遥感估算以及模型模拟等方法[12]。由于调查土壤和植被碳储量工作量很大[13]，且不能直观反映长时间序列以及空间尺度上气候变化和土地利用变化对碳储量的影响，导致其仅适用于小地区或少量样地的碳储量估算[14]。InVEST（Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs）模型以土地利用数据为基础，可以实现不同目标、不同情景下的陆地生态系统碳储量空间分布及影响评估[15]，被大量学者广泛应用。目前，已有大量学者基于InVEST模型从国家、省级、流域、保护区等长时间序列和不同空间尺度研究了碳储量的分布，且研究表明土地利用变化极大地影响陆地生态系统碳储量[16]，因此，对陆地生态系统的管理具有重大意义，并且以此寻找提高陆地生态系统碳储量最优的土地利用方式。近年来，流域生态系统服务广受大量学者关注，流域作为一个复合系统且具有不

收稿日期：2023-01-29； **修订日期：**2023-02-10
基金项目：中国科学院A类战略性先导科技专项（XDA20100305）；国家自然科学基金面上项目（41971083）
作者简介：张晓敏（1998-），女，硕士研究生，主要从事寒区生态系统服务研究. E-mail: zhangxiaomin@nieer.ac.an
通讯作者：张伟. E-mail: zhangw06@lzb.ac.cn

同的自然资源以及生态系统要素,从流域尺度估算不同生态系统服务有助于解决流域内生态环境问题[17]。因此,本文针对流域尺度,结合时间和空间尺度估算并分析不同土地利用类型对陆地生态系统碳储量的研究,有助于流域内生态环境持续发展,以此来促进土地利用优化配置。

寒区碳库是全球碳库的重要组成部分,主要分布在北极、亚北极和北方地区及气候变化敏感的中低纬度高山和高原地区[18],额尔齐斯河流域地处我国西北干旱寒冷地区,植被类型丰富,植被和土壤两者内含碳储量巨大,由于年平均温度较低,土壤有机质分解速度较慢,使之成为我国碳密度很高的地区之一,可见寒区固碳很重要[19]。该流域是典型的山地-绿洲-荒漠复合生态系统,地形复杂,地域差异明显,生态环境脆弱,但具有极其重要的生态系统服务功能,这一复合生态系统提供了水源涵养、土壤保持、防风固沙、水质净化、生物多样性和碳储存等多样化生态系统服务。InVEST模型广泛应用于不同生态系统服务评估,因此,本文将通过构建额尔齐斯河流域的InVEST模型,分别量化流域内生态系统碳储量空间分布和土地利用变化对流域内生态系统碳储量的影响,从而探寻土地利用最优方式以提高流域内生态系统碳储量,研究结果将有助于进一步改善流域生态系统服务功能及探索寒区碳储量具有重要意义。

1 研究区概况

额尔齐斯河发源于阿尔泰山南坡(图1),是北疆最大的河流,新疆的第二大河,并且是我国唯一注入北冰洋的国际河流,该流域介于46°55′~49°10′N,85°30′~90°30′E,海拔高度介于300~4000 m。该流域分为东部和西部两部分,西部的地貌特征可概括为两山夹一谷,两山是阿尔泰山和萨吾尔山,一谷是额尔齐斯河河谷,东部的地形以山地和平原为主,整个流域呈现北高南低,西高东低的地势特点。额尔齐斯河流域处于纬度多年冻土的南界区域,全流域多年平均气温4 ℃左右,山区多年平均降水量能达到500 mm左右,平原多年平均降水量达到150 mm左右,土壤类型主要为棕钙土和栗钙土。该流域分布耕地、林地、草地、水域、城乡、工矿、居民用地和未利用地6种土地利用类型。其中森林植被

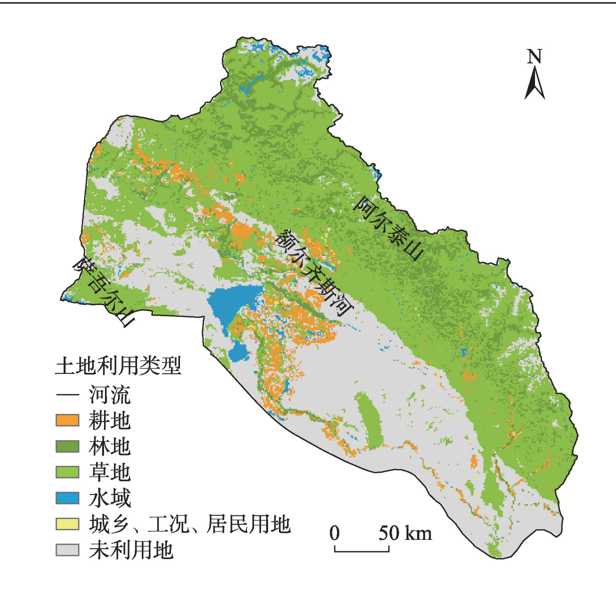


图1 研究区地理位置及土地利用类型

Fig. 1 Geographical location and land use type of the study area

类型主要有针叶林和阔叶林组成,主要树种有西伯利亚落叶松(*Larix sibirica* Ledeb.)、西伯利亚云杉(*Picea obovate*)、西伯利亚冷杉(*Abies sibirica*)等。该流域的人类活动主要分布在低海拔地区以及水系湖泊周围[20-21]。

2 方法与数据

2.1 研究方法

2.1.1 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵反映不同土地利用类型之间的转移情况,不仅反映额尔齐斯河流域内不同时期内各类土地利用类型的转移变化情况,而且还能反映出该流域内不同时期末各土地利用类型的来源。其数学形式[22]如下

$$S=\begin{bmatrix} S_{ij} & \cdots & S_{in} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ S_{nj} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中:S为土地利用转移矩阵;i、j($i,j=1,2,\cdots,n$)分别为转移前和转移后的土地利用类型;n为转移前后的土地利用类型数,取值6;S_{ij}表示转移前的i地类转换成转移后的j地类的面积。

2.1.2 碳储量 InVEST模型的碳储存模块将陆地生态系统碳储量划分为4类碳库[23]:地上生物量碳库(土壤以上所有存活的植物材料如树皮、树干、树枝和树叶中的碳)、地下生物量碳库(植物活的根系统中的碳)、土壤碳库(矿质土壤和有机土壤中的有

机碳）、死亡有机物碳库（凋落物、倒立或站立的已死亡树木中的碳）。基于InVEST碳储存模型的目的，暂不考虑地上碳库中极不稳定的碳，如短周期一年生农作物等，因为该类碳库相对于陆地生态系统碳库，含量相对较少且非常稳定或更新较快[23–24]。

根据额尔齐斯河流域内土地利用的分类情况，分别对不同土地利用类型的地上生物量碳库、地下生物量碳库、土壤碳库和死亡有机物碳库的平均碳密度进行计算统计，然后用各个土地利用类型的面积乘以4类碳库的总碳密度并求和，得出该流域内的总碳储量。其计算公式如下[23]：

$$C_i = C_{i,\mathrm{above}} + C_{i,\mathrm{below}} + C_{i,\mathrm{soil}} + C_{i,\mathrm{dead}} \quad (2)$$

$$C_{\mathrm{total}} = \sum_{i=1}^{n} C_i \times S_i \quad (3)$$

式中：i为第i种土地利用类型；C_i为土地利用类型i的4类碳库的总碳密度（t·hm^{-2}）；$C_{i,\mathrm{above}}$为土地利用类型i储存在地上生物量中的碳密度（t·hm^{-2}）；$C_{i,\mathrm{below}}$为土地利用类型i储存在地下生物量中的碳密度（t·hm^{-2}）；$C_{i,\mathrm{soil}}$为土地利用类型i储存在土壤中的碳密度（t·hm^{-2}）；$C_{i,\mathrm{dead}}$为土地利用类型i储存在死亡有机物中的碳密度（t·hm^{-2}）；C_{total}为总碳储量（t）；S_i为土地利用类型i的总面积（hm^2）；n为土地利用类型数，取值6。

2.2 数据来源

土地利用数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn），空间分辨率为1 km×1 km。结合额尔齐斯河流域实际情况，裁剪得到研究区的土地利用类型，划分为耕地、林地、草地、水域、城乡、工矿、居民用地和未利用地6个一级类型以及24个二级类型，选取2000年、2005年、2010年、2015年和2020年共计5期数据。行政边界数据来自于中国科学院资源环境数据中心(http://www.resdc.cn)，河流和流域边界数据来自于国家地球系统科学数据中心（http://www.geodata.cn），并掩膜提取得到研究区的矢量数据。

2.3 碳密度数据

由于额尔齐斯河流域的分布范围广，流域内不同土地类型的碳密度无法一一调研。依据InVEST模型用户手册，模型中的碳储存模块假设同一土地利用类型的碳密度是一个常数，且无年际变化。因此，地上生物量碳库、地下生物量碳库、土壤碳库和死亡有机物碳库的碳密度数据从模型手册、阿尔泰山、伊犁谷底和西部干旱区文献中获得[23, 25–27]，相关参数见表1。

3 结果与分析

3.1 2000—2020年土地利用变化

如图2所示，额尔齐斯河流域的土地利用类型主要以草地为主，其年平均面积占比49.30%，其次为未利用地，年平均面积占比34.37%。该流域的土地利用类型在时间上呈现不同的变化趋势。2000—2020年，耕地面积持续扩张，由2566.51 km^{2}增加至5185.87 km^2，增加幅度为3.24%；林地面积呈缩减趋势，由7954.56 km^{2}减少至5625.68 km^2，减少幅度为2.88%，林地面积的持续下降会对研究区的生态环境产生影响；草地面积呈先缩减后扩张趋势，由38962.74 km^{2}增加至43687.87 km^2，增加幅度为5.85%；水域面积呈先扩张后缩减趋势，由1845.80 km^{2}增加至1879.27 km^2，增加幅度为0.04%；城乡、工矿、居民用地面积呈扩张趋势，由107.47 km^{2}增加至294.16 km^2，增加幅度为0.23%；未利用地面积呈缩减趋势，由29328.78 km^{2}减少至24093.02 km^2，减少幅度为6.48%。

表1 额尔齐斯河流域不同土地利用类型的4类碳密度

Tab. 1 Four types of carbon densities of different land use types in Irtysh River Basin /(t·hm^{-2})

土地利用类型	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}
耕地	5.44	2.57	79.5	0.82
林地	50.43	13.16	141.29	0.82
草地	8.58	7.24	93.75	0.36
水域	0.93	0	0	0
城乡、工矿、居民用地	3.29	0	7.1	0
未利用地	0.75	0	7.8	0

注：C_{above}为地上生物量碳密度；C_{below}为地下生物量碳密度；C_{soil}为土壤碳密度；C_{dead}为死亡有机质碳密度。

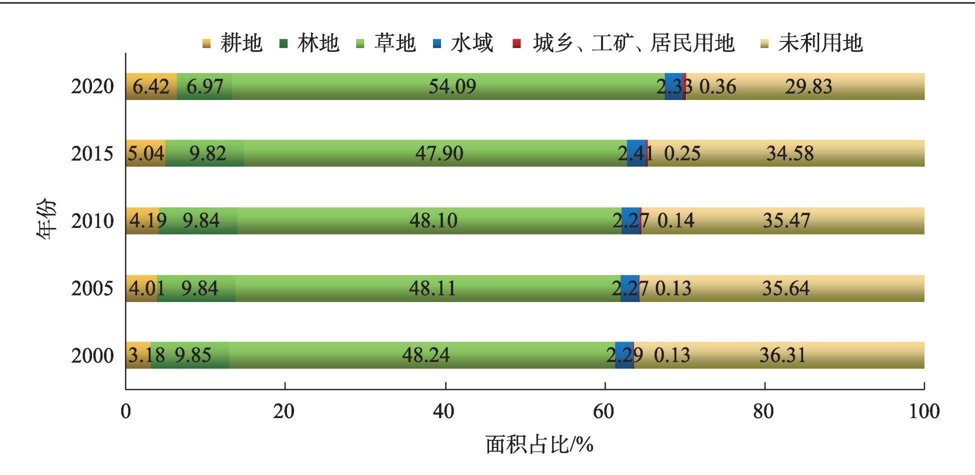


图2 2000—2020年土地利用类型的面积占比

Fig. 2 Area proportion of land use types from 2000 to 2020

从土地利用转移矩阵(表2)所示:2000—2005年,总转移面积占流域面积的1.32%,耕地面积增加676.22 km²,主要来自草地和未利用地;水域面积减少15.08 km²,主要转为未利用地;城乡、工矿和居民用地面积增加0.73 km²;未利用地面积减少547.50 km²,主要转化为耕地;林地和草地面积分别减少7.21 km²和107.17 km²。2000—2010年,总转移面积占流域总面积的1.61%,耕地面积增加815.14 km²;水域面积减少12.98 km²;城乡、工矿和居民用地面积增加3.05 km²;未利用地面积减少684.93 km²,主要转化为耕地;林地面积减少6.72 km²;草地面积减少113.56 km²。2000—2015年,总转移面积占流域总面积的2.98%,耕地面积增加1505.64 km²,主要来自草地和未利用地的流失;水域面积增加97.14 km²,主要来自未利用地和草地;城乡、工矿和居民用地面积增加91.89 km²,来自耕地、林地和未利用地;未利用地面积减少1398.28 km²,主要转化为耕地;林地和草地面积分别减少25.64 km²和272.56 km²。2000—2020年,总转移面积占流域总面积的32.02%,耕地面积增加2619.35 km²,主要来自草地和未利用地;水域面积增加33.47 km²;城乡、工矿和居民用地面积增加186.68 km²,来自耕地、林地、草地和未利用地;未利用地面积减少5235.76 km²,主要转化为耕地和草地;林地面积减少2328.88 km²,主要转化为草地;草地面积增加4725.13 km²,主要来自林地和未利用地。

综上所述,2000—2015年不同土地利用类型转换中,大部分是未利用地到耕地的转换,占总转移面积的54.91%,主要原因是人类加大了对未利用地的开发程度,通过开荒来增加耕地,以维持粮食的供给。2000—2020年土地利用类型转换中,却发生了翻天覆地的变化,大部分土地利用类型都发生了变化。

3.2 2000—2020年碳储量空间变化

从空间分布图来看(图3),2000—2015年额尔齐斯河流域碳储量分布格局较为一致,均呈带状分布,并无明显的空间变化,但在2020年碳储量空间分布发生明显的变化,变化区域主要位于流域的西部、北部和东南方向。其中碳储量较高的区域主要位于高海拔区域,该区域土地利用类型主要为林地和草地,其次海拔越高人类活动逐渐减少,植被破坏也随之减小,因此碳储量较高;碳储量较低的区域主要位于低海拔区域,该区域土地利用类型主要为未利用地,其次人类活动频繁,土壤和植被碳含量相对较小,其碳储量相对偏小。2000年、2005年、2010年、2015年和2020年流域内碳储量分别为641.60 Tg、645.78 Tg、646.83 Tg 、650.28 Tg 和665.91 Tg,其年增长率为0.95%,呈现上升趋势。

为了直观地反映额尔齐斯河流域碳储量的空间变化,将2000—2020年碳储量空间变化值分为3类:减少、无变化和增加。由图4可知,2000—2015年流域的碳储量空间分布大部分区域无变化,只有小部分区域的碳储量发生了变化,其变化区域均呈点状分布,且主要分布在低海拔地区。2000—2005年碳储量增加的区域面积为736.43 km²,占流域总面积的0.91%;碳储量减少的区域面积为331.07 km²,占流域总面积的0.41%。2000—2010年碳储量

表2 2000—2020年额尔齐斯河流域土地利用转移矩阵

Tab. 2 Land use transfer matrix of Irtysh River Basin from 2000 to 2020

2000—2005年

面积/km²	耕地	林地	草地	水域	城乡、工矿、居民用地	未利用地	2000年总计
耕地	2487.65	0.82	63.28	0.77	0.60	13.38	2566.51
林地	10.48	7934.87	3.35	1.96	0	3.90	7954.56
草地	226.95	7.43	38685.38	5.35	1.42	36.21	38962.74
水域	1.89	0	11.35	1794.52	0	38.05	1845.80
城乡、工矿、居民用地	2.29	0	0	0	105.19	0	107.47
未利用地	513.47	4.22	92.21	28.13	1.00	28689.75	29328.78
2005年总计	3242.73	7947.35	38855.57	1830.73	108.21	28781.28	80765.87
净转化量	676.22	−7.21	−107.17	−15.08	0.73	−547.50	

2000—2010年

面积/km²	耕地	林地	草地	水域	城乡、工矿、居民用地	未利用地	2005年总计
耕地	2478.98	1.29	69.42	0.77	1.66	14.38	2566.51
林地	10.70	7930.74	4.28	4.60	0	4.24	7954.56
草地	258.27	9.64	38634.16	9.26	2.75	48.67	38962.74
水域	4.27	0.06	14.51	1782.03	0	44.93	1845.80
城乡、工矿、居民用地	2.29	0	0.06	0	105.12	0	107.47
未利用地	627.14	6.10	126.73	36.16	1.00	28531.64	29328.78
2010年总计	3381.65	7947.83	38849.18	1832.82	110.53	28643.86	80765.87
净转化量	815.14	−6.72	−113.56	−12.98	3.05	−684.93	

2000—2015年

面积/km²	耕地	林地	草地	水域	城乡、工矿、居民用地	未利用地	2010年总计
耕地	2441.03	2.33	82.03	1.77	20.97	18.39	2566.51
林地	19.22	7893.08	16.10	12.04	4.21	9.92	7954.56
草地	421.59	22.47	38363.02	48.54	31.63	75.49	38962.74
水域	8.01	0.03	19.65	1773.53	0	44.58	1845.80
城乡、工矿、居民用地	2.44	0	0.06	0	104.88	0.09	107.47
未利用地	1179.87	11.01	209.31	107.32	37.68	27783.58	29328.78
2015年总计	4072.15	7928.92	38690.18	1943.21	199.36	27932.04	80765.87
净转化量	1505.64	−25.64	−272.56	97.41	91.89	−1396.74	

2000—2020年

面积/km²	耕地	林地	草地	水域	城乡、工矿、居民用地	未利用地	2000年总计
耕地	1808.18	63.28	533.36	25.51	59.12	77.07	2566.51
林地	196.07	2849.38	4575.15	94.13	16.94	222.89	7954.56
草地	1299.60	2522.22	30162.99	228.07	90.67	4659.19	38962.74
水域	53.99	58.17	226.59	1214.05	1.46	291.54	1845.80
城乡、工矿、居民用地	41.77	5.30	22.81	1.78	32.91	2.90	107.47
未利用地	1786.26	127.34	8166.96	315.73	93.05	18839.44	29328.78
2020年总计	5185.87	5625.68	43687.87	1879.27	294.16	24093.02	80765.87
净转化量	2619.35	−2328.88	4725.13	33.47	186.68	−5235.76	

增加的区域面积为910.20 km²,占流域总面积的1.13%;碳储量减少的区域面积为392.98 km²,占流域总面积的0.49%。2000—2015年碳储量增加的区域面积为1574.91 km²,占流域总面积的1.95%;碳储量减少的区域面积为831.45 km²,占流域总面积的1.03%。而2000—2020年碳储量空间变化较为明显,变化区域呈点状和带状分布,碳储量增加的区域面积为13994.10 km²,占流域总面积的17.33%;碳储量减少的区域面积为11864.82 km²,占流域总面积的14.69%。

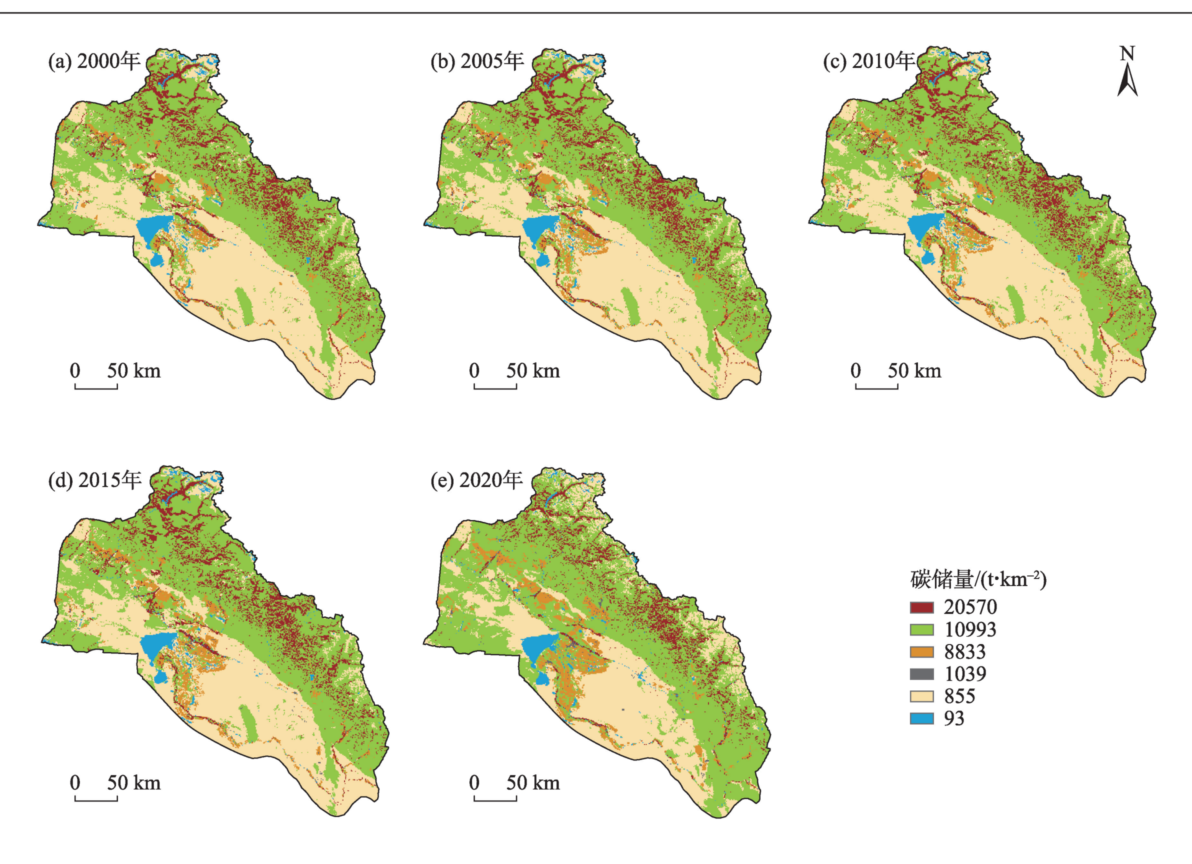


图3　2000—2020年碳储量的空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of carbon storage from 2000 to 2020

3.3　2000—2020年土地利用变化对碳储量的影响

表3反映了2000—2020年由于土地利用变化而导致的碳储量的变化情况。由表3可知，2000—2005年流域碳储量增加4.18 Tg；从转移面积来看，主要是以草地和未利用地转化为耕地为主，其中草地转化为耕地减少碳储量0.49 Tg，而未利用地转化为耕地碳储量增加4.10 Tg；2000—2010年流域碳储量增加5.23 Tg；从转移面积来看，主要是以草地和未利用地转化为耕地为主，其中草地转化为耕地碳储量减少0.56 Tg，而未利用地转化为耕地碳储量增加5.00 Tg；2000—2015年流域碳储量增加8.68 Tg，从转移面积来看，主要是以草地和未利用地转化为耕地，其中草地转化为耕地碳储量减少0.91 Tg，而未利用地转化为耕地碳储量增加9.41 Tg；2000—2020年流域碳储量增加24.31 Tg，从转移面积来看，主要是林地转化为草地和未利用地转化为草地为主，其中林地转化为草地碳储量减少53.70 Tg，而未利用地转化为草地碳储量增加82.80 Tg。

总体来说，2000—2020年主要是因为大面积的未利用地转化为耕地和草地，植被使得土壤碳密度、地上生物量碳密度和地下生物量碳密度增加，从而增加了流域内总碳储量；2000—2015年林地面积减少程度低，而2000—2020年林地大面积减少，因此，林地向耕地、草地和未利用的转出导致流域内总碳储量减少；水域向其他5类土地利用类型的转出，都会增加流域总碳储量；草地向耕地、水域和未利用地的转出，导致流域总碳储量降低。

如图5a所示，2000—2005年从碳储量的变化来看，其中草地到未利用地和耕地的转化，碳储量分别减少0.37 Tg和0.49 Tg；而未利用地到草地和耕地的转化，碳储量分别增加0.94 Tg和4.10 Tg；如图5b所示，2000—2010年从碳储量的变化来看，其中草地到未利用地和耕地的转化，碳储量分别减少0.49 Tg和0.56 Tg；而未利用地到草地和耕地的转化，碳储量分别增加1.29 Tg和50.00 Tg；如图5c所示，2000—2015年从碳储量的变化来看，其中草地到未利用地、水域和耕地的转化，碳储量分别减少0.77 Tg、0.53 Tg和0.91 Tg；而未利用地到草地和耕地的转化，碳储量分别增加2.12 Tg和9.41 Tg；如图5d所示，2000—2020年从碳储量的变化来看，其中草地到未利用地转化，碳储量减少47.24 Tg；而未利用地到草地和耕地的转化，碳储量分别增加82.80 Tg和14.25 Tg。

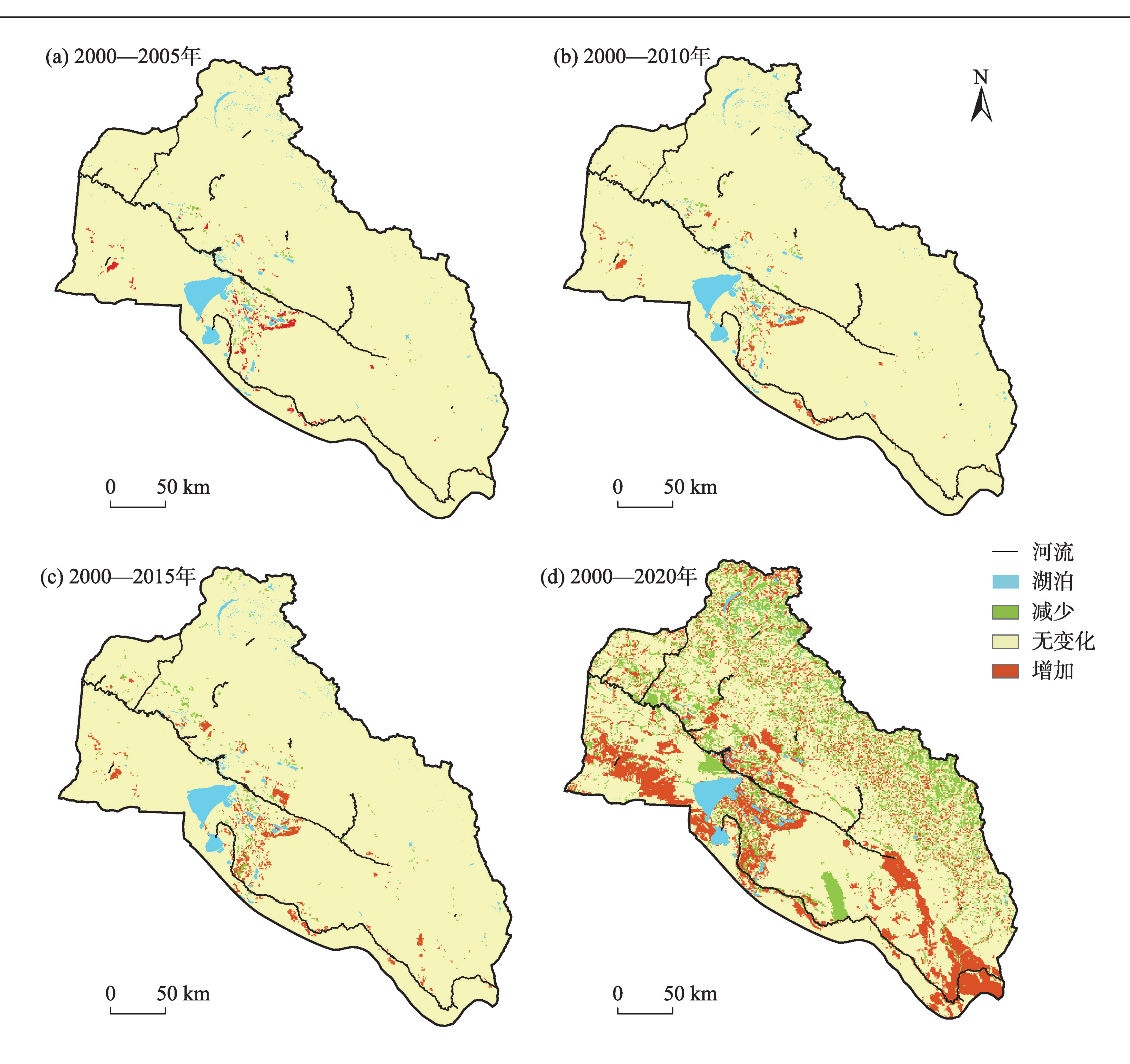


图4 2000—2020年碳储量变化的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of carbon storage change from 2000 to 2020

总体来说,2000—2015年碳储量减少主要是草地到未利用地和耕地的转化,年平均减少量为2.55 Tg,说明毁草造田和荒漠化是草地碳储量减少的原因;碳储量增加主要是未利用地到耕地和草地的转化,年平均增加量为8.26 Tg,这一时期耕地的来源主要是开垦未利用地造田,使种植面积持续增加,以此增加流域内碳储量。2000—2020年碳储量减少主要是林地转为草地和草地转为未利用地,年平均减少量为58.81 Tg;碳储量增加主要是未利用地转化为草地和耕地以及草里转化为林地,年平均增加量为64.82 Tg。不同时期的碳储量净固持量都大于净释放量,因此,额尔齐斯河流域总体固碳能力呈上升趋势。

4 讨 论

本研究表明,2000—2020年额尔齐斯河流域总碳储量呈现上升趋势,一定程度上反映了额尔齐斯河流域固碳功能有所提高,这一结果与具有寒区特征的疏勒河流域研究结果趋势一致,一直呈现上升趋势[28]。未利用地面积缩减、耕地和草地面积扩张是导致流域碳储量增加的最主要原因。从碳储量的空间分布及变化来看,2000—2015年碳储量空间分布格局一致,导致上述结果产生的原因可能为:一是额尔齐斯河流域处于西北干旱且边境地区人类活动较少,导致近15 a土地利用变化程度小;二是由于InVEST碳模型计算过程中,假设同一土地利用类型的碳密度是一个常数,忽略了灌木、乔木等植被的碳储量会年际增长,都会引起流域内碳储量增加[29]。碳储量减少或增加的区域呈点状分布,主要分布在水系或者湖泊周围,这些区域海拔低并且人类活动频繁,对耕地、建设用地的需求增加,因此,该区域土地利用方式变化较其他区域也更为剧烈。而2020年的碳储量空间分布相比其他年份,却

表3 2000—2020年不同土地利用类型转换面积及碳储量变化

Tab. 3 Changes of converted area and carbon storage of different land use types from 2000 to 2020

土地利用类型转化	2000—2005年		2000—2010年		2000—2015年		2000—2020年	
	面积转移/km^2	碳储量变化/10^{-1}Tg	面积转移/km^2	碳储量变化/10^{-1}Tg	面积转移/km^2	碳储量变化/10^{-1}Tg	面积转移/km^2	碳储量变化/10^{-1}Tg
林地-耕地	10.48	-1.23	10.70	-1.26	19.22	-2.26	196.07	-23.01
草地-耕地	226.95	-4.90	258.27	-5.58	421.59	-9.11	1299.60	-28.07
水域-耕地	1.89	0.17	4.27	0.37	8.01	0.70	53.99	4.72
居民用地-耕地	2.29	0.18	2.29	0.18	2.44	0.19	41.77	3.26
未利用地-耕地	513.47	40.96	627.14	50.03	1179.87	94.13	1786.26	142.51
耕地-林地	0.82	0.10	1.29	0.15	2.33	0.27	63.28	7.43
草地-林地	7.43	0.71	9.64	0.92	22.47	2.15	2522.22	241.55
水域-林地	0	0	0.06	0.01	0.03	0.01	58.17	11.91
居民用地-林地	0	0	0	0	0	0	5.30	1.03
未利用地-林地	4.22	0.83	6.10	1.20	11.01	1.29	127.34	14.95
耕地-草地	63.28	1.37	69.42	1.50	82.03	1.77	533.36	11.52
林地-草地	3.35	-0.39	4.28	-0.50	16.10	-1.89	4575.15	-536.99
水域-草地	11.35	1.24	14.51	1.58	19.65	2.14	226.59	24.70
居民用地-草地	0	0	0.06	0.01	0.06	0.01	22.81	2.27
未利用地-草地	92.21	9.35	126.73	12.85	209.36	21.22	8166.96	827.97
耕地-水域	0.77	-0.07	0.77	-0.07	1.77	-0.15	25.51	-2.23
林地-水域	1.96	-0.40	4.60	-0.94	12.04	-2.47	94.13	-19.27
草地-水域	5.35	-0.58	9.26	-1.01	48.54	-5.29	228.07	-24.86
居民用地-水域	0	0	0	0	0	0	1.78	-0.02
未利用地-水域	28.13	-0.21	36.16	-0.28	107.32	-0.82	315.73	-2.41
耕地-居民用地	0.60	-0.05	1.66	-0.13	20.97	-1.63	59.12	-4.61
林地-居民用地	0	0	0	0	4.21	-0.82	16.94	-3.31
草地-居民用地	1.42	0.14	2.75	0.27	31.63	-3.15	90.67	-9.03
水域-居民用地	0	0	0	0	0	0	1.46	0.01
未利用地-居民用地	1.00	0.00184	1.00	0.00	37.68	0.07	93.05	0.17
耕地-未利用地	13.38	-1.07	14.38	-1.15	18.39	-1.47	77.07	-6.15
林地-未利用地	3.90	-0.77	4.24	-0.84	9.92	-1.96	222.89	-43.94
草地-未利用地	36.21	-3.67	48.67	-4.93	75.48	-7.65	4659.19	-472.35
水域-未利用地	38.05	0.29	44.93	0.34	44.58	0.34	291.54	2.22
居民用地-未利用地	0	0	0	0	0.09	-0.00016	2.90	-0.01

发生很大变化，其原因在于《阿勒泰地区国民经济和社会发展第十三个五年规划》从2016年开始到2020年结束，这期间鼓励发展特色种植业，旅游业发展迅速使城镇化加剧，充分发挥了该流域的地理优势；并且实施了退牧还草、退耕还林、退耕还草和退耕还湿等工程的同时加大对胡杨林、荒漠灌木林、河谷林等公益林保护力度，导致2020年的土地利用方式相比其他年份发生巨大变化，使碳储量也发生很大变化。因此，土地利用变化极大程度影响该流域内陆地生态系统碳储量[30]，一方面，不同土地利用类型的相互转移使各土地利用类型碳储量发生变化，从而影响流域内总碳储量的变化。另一方面，当碳密度低的土地利用类型向碳密度高的土地利用类型转化时，将会导致流域内总碳储量增加；反之，则会造成流域内总碳储量减少。草地作为额尔齐斯河流域最主要的土地利用类型，分布范围广，是研究区巨大的碳库，因此要防止草地的缩减，导致草地的碳储量减少。林地对于额尔齐斯河流域的碳储量也具有很大的影响[19]，林地的土壤和植被碳储量是各地类最高，因此林地转化为草地或耕地时，导致碳储量减少，是碳的释放过程[31-33]。总而言之，土地利用变化、植被类型、气候变化和放牧等

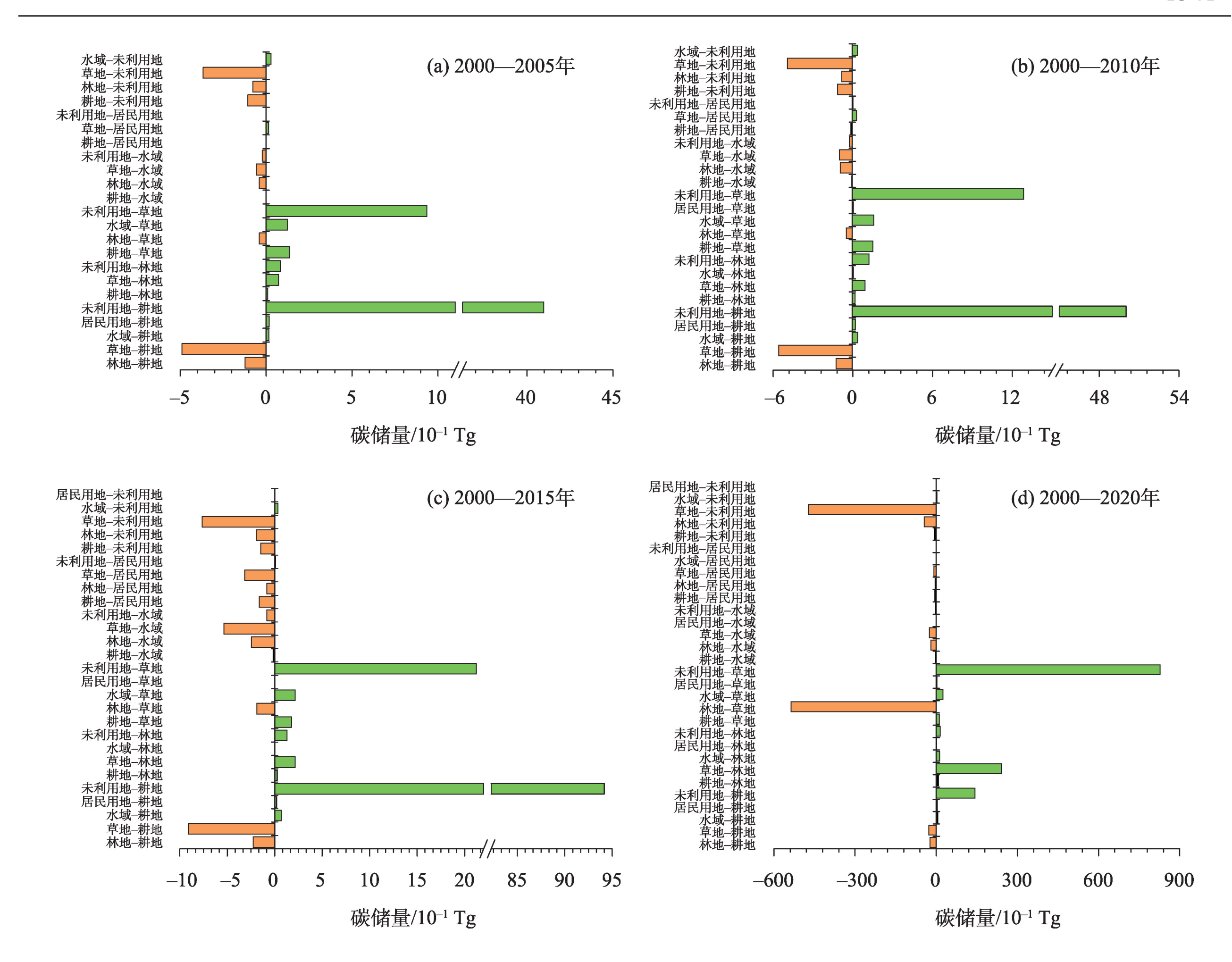


图5　土地利用变化对碳储量的影响

Fig. 5　Impact of land use change on carbon storage

都对流域生态系统碳储量产生影响。因此，应继续贯彻落实退耕还林还草、退牧还草、人工造林和封山育林等政策以此有效增加碳汇水平[34]。

同时，也要关注耕地的扩张会带来更多水资源供应的不确定性[35]，大量开垦未利用地变为耕地，种植面积不断增加，以此来增加流域内的碳储量，与此同时面临耕地不断增加会造成农业用水量增加，消耗更多水资源。2000—2020年额尔齐斯河流域内耕地面积持续增加，大面积的农作物种植面积变化影响农业需水量的重新调整，并且需水量的增加不仅会增加其他方面的用水紧张程度，更是会引起流域内生态环境问题[36]。农作物生长需要长期不断灌溉以及大量施肥，导致大量灌溉水以及降水的冲洗会将耕地内多余的氮、磷等元素带入土壤或地下水，从而造成土壤和水质污染等一系列环境问题[36]。尽管额尔齐斯河流域靠近水系的未利用地较多，但仍要避免过多开垦未利用地加剧水资源分配不均问题。耕地和水资源之间的复杂关系影响着水土资源的可利用率，继而影响额尔齐斯河流域内的农业生产和农业经济的持续性发展[37]。综上所述，开垦未利用地变为耕地，有利有弊，一方面增加流域内总碳储量，另一方面，消耗更多水资源，造成水资源短缺。因此，在扩大耕地面积时，要充分考虑流域内水资源和耕地的耦合关系和匹配水平，不能盲目开采利用，防止产生新的流域生态环境问题。因此，应统筹协调该流域内水土资源的合理规划，形成效益最大化的水资源利用率，实现耕地和水资源的合理利用[38-39]，最终实现额尔齐斯河流域经济的可持续发展。

本研究是基于InVEST模型来评估2000—2020年流域内碳储量及其变化。在模型运算中，碳密度无年际变化，并且假设额尔齐斯河流域生态系统的各组分的碳密度在时间尺度上是保持不变的。因此，额尔齐斯河流域生态系统碳储量的变化主要是

由于该流域内不同土地利用类型的相互转移而导致，但是随着乔木、灌木以及草本植被等的生长，流域内各组分的碳密度可能会不断增加，同时，InVEST模型也没有考虑农田收割前后的4类碳库（地上碳库、地下碳库、土壤碳库和死亡有机碳库）的碳密度变化，可能会影响陆地生态系统的固碳潜力，其次InVEST模型的碳储存模块只考虑了不同土地利用类型的碳密度而未考虑到不同土地利用类型的空间异质性，评估结果只会随着土地利用类型变化而变化，最后寒区的特殊环境也会进一步加剧，这些都会造成额尔齐斯河流域总碳储量估算的不确定性。因此，在今后的研究中应加强对额尔齐斯河流域布设样地并实施碳密度连续监测。

5 结 论

基于InVEST模型模拟不同时期流域内的碳储量空间分布以及土地利用变化对碳储量的影响。主要结论如下：

（1）2000—2020年额尔齐斯河流域土地利用类型以林地、草地和未利用地为主，土地利用格局发生明显改变，耕地、水域和城乡、工矿、居民用地面积持续扩张，草地先缩减后扩张，林地和未利用地面积持续缩减。

（2）2000—2015年额尔齐斯河流域碳储量空间分布格局较为一致，而2020年流域内碳储量变化区域主要位于流域的西部、北部和东南方向，均呈现带状分布，且碳储量高值区分布在林地和草地聚集的高海拔地区，碳储量低值区主要分布在未利用地聚集的低海拔地区。2000年、2005年、2010年、2015年和2020年流域内碳储量总量分别为641.60 Tg、645.78 Tg、646.83 Tg、650.28 Tg和665.91 Tg，年增长率为0.95%，呈现上升趋势。

（3）额尔齐斯河流域碳储量减少或增加的区域呈点状和带状分布，碳储量减少的区域主要是草地到未利用地和耕地的转化，年平均减少量58.81 Tg；碳储量增加的区域主要是未利用地到耕地和草地的转化，年平均增加量64.82 Tg。2000—2020年碳储量的净固持量都大于净释放量，因此，额尔齐斯河流域的固碳能力呈上升趋势。

参考文献（References）：

[1] 新华社. 碳中和"元年"启步[J]. 经济, 2021(2): 40–45. [Xinhua News Agency. The beginning of the first year of carbon neutrality[J]. Economy, 2021(2): 40–45.]

[2] 方精云, 于贵瑞, 任小波, 等. 中国陆地生态系统固碳效应——中国科学院战略性先导科技专项"应对气候变化的碳收支认证及相关问题"之生态系统固碳任务群研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 848–857, 875. [Fang Jingyun, Yu Guirui, Ren Xiaobo, et al. Carbon sequestration in terrestrial ecosystems in China: A review of the carbon sequestration task group of the Chinese academy of sciences "Strategic Leading Science and Technology Project "carbon Budget certification and related issues in response to climate change"[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(6): 848–857, 875.]

[3] 戴尔阜, 黄宇, 吴卓, 等. 内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 21–34. [Dai Erfu, Huang Yu, Wu Zhuo, et al. Spatial-temporal features of carbon source-sink and its relationship with climate factors in Inner Mongolia grassland ecosystem[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(1): 21–34.]

[4] 季劲钧, 黄玫, 李克让. 21世纪中国陆地生态系统与大气碳交换的预测研究[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2008, 38(2): 211–223. [Ji Jinjun, Huang Mei, Li Kerang. Prediction of carbon exchange between terrestrial ecosystem and atmosphere in China in the 21st century[J]. Science in China(Series D: Earth Sciences), 2008, 38(2): 211–223.]

[5] Piao Shilong, Fang Jingyun, Ciais Philippe, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 2009, 458(7241): 1009–1013.

[6] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems[J]. Nature, 2001, 414(6860): 169–172.

[7] 田多松, 傅碧天, 吕永鹏, 等. 基于SD和CLUE-S模型的区域土地利用变化对土壤有机碳储量影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(4): 613–620. [Tian Duosong, Fu Bitian, Lv Yongpeng, et al. Effect of regional land-use change on soil organic carbon storage based on SD and CLUE-S model[J].Effect Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(4): 613–620.]

[8] 廖亮林, 周蕾, 王绍强, 等. 2005—2013年中国新增造林植被生物量碳库固碳潜力分析[J].地理学报, 2016, 71(11): 1939–1947. [Liao Lianglin, Zhou Lei, Wang Shaoqiang, et al. Carbon sequestration potential of biomass carbon pool for new afforestation in China during 2005–2013[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(11): 1939–1947.]

[9] Lai Li, Huang Xianjin, Yang Hong, et al. Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010[J]. Science Advances, 2016, 2(11): e1601063–e1601063.

[10] Han Xinhui, Zhao Fazhu, Tong Xiaogang, et al. Understanding soil carbon sequestration following the afforestation of former arable land by physical fractionation[J]. Catena, 2017, 150: 317–327.

[11] 黄磊, 王长科, 巢清尘. IPCC《气候变化与土地特别报告》解读

[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(1): 1-8. [Huang Lei, Wang Changke, Chao Qingchen. Interpretation of IPCC special report on climate change and land[J]. Climate Change Research, 2020, 16 (1): 1-8.]

[12] 刘苗, 刘国华. 土壤有机碳储量估算的影响因素和不确定性[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1222-1232. [Liu Miao, Liu Guohua. Impact factors and uncertainties of the estimation on soil organic carbon storage[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23 (7): 1222-1232.]

[13] 杨昕, 王明星. 陆面碳循环研究中若干问题的评述[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 427-435. [Yang Xin, Wang Mingxing. Reviews of several aspects of terrestrial cadbon cycling[J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(3): 427-435.]

[14] 李博, 刘存歧, 王军霞, 等. 白洋淀湿地典型植被芦苇储碳固碳功能研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2603-2607. [Li Bo, Liu Cunqi, Wang Junxia, et al. Carbon storage and fixation function by phragmites australis, a typical vegetation in Baiyangdian Lake[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2603-2607.]

[15] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 等. 生态系统服务权衡:方法、模型与研究框架[J]. 地理研究, 2016, 35(6): 1005-1016. [Dai Erfu, Wang Xiaoli, Zhu Jianjia, et al. Methods, tools and research framework of ecosystem service trade-offs[J]. Geographical Research, 2016, 35(6): 1005-1016.]

[16] Li Kongming, Cao Jianjun, Adamowsek Jan F, et al. Assessing the effects of ecological engineering on spatiotemporal dynamics of carbon storage from 2000 to 2016 in the Loess Plateau area using the InVEST model: A case study in Huining County, China[J]. Environmental Development, 2021, 39: 1-15.]

[17] 敦越, 杨春明, 袁旭, 等. 流域生态系统服务研究进展[J]. 生态经济, 2019, 35(7): 179-183. [Dun Yue, Yang Chunming, Yuan Xu. Review of researcheson watershed ecosystem services[J]. Ecological Economy, 2019, 35(7): 179-183.]

[18] 马蔷, 金会军. 气候变暖对多年冻土区土壤有机碳库的影响[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 91-103. [Ma Qiang, Jin Huijun. Impacts of climate warming on soil organic carbon pools in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 91-103.]

[19] 李若玮, 叶冲冲, 王毅, 等. 基于InVEST模型的青藏高原碳储量估算及其驱动力分析[J]. 草地学报, 2021, 29(S1): 43-51. [Li Ruowei, Ye Chongchong, Wang Yi, et al. Carbon storage estimation and its drivering force analysis based on InVEST model in the Tibetan Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(S1): 43-51.]

[20] 王国亚, 毛炜峄, 贺斌, 等. 新疆阿勒泰地区积雪变化特征及其对冻土的影响[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1293-1300. [Wang Guoya, Mao Weiyi, He Bin, et al. Changes in snow covers during 1961-2011 and its effects on frozen ground in Altay Region, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(6): 1293-1300.]

[21] 吴雪娇, 潘小多, 沈永平, 等. WRF模式制备的气象驱动数据在新疆喀依尔特斯河流域的验证[J].冰川冻土, 2016, 38(2): 332-340. [Wu Xuejiao, Pan Xiaoduo, Shen Yongping, et al. Validation of WRF model on simulating forcing data for Kayiertesi River Basin, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38 (2): 332-340.]

[22] 张建国, 李晶晶, 殷宝库, 等. 基于转移矩阵的准格尔旗土地利用变化分析[J]. 水土保持通报, 2018, 38(1): 131-134. [Zhang Jianguo, Li Jingjing, Yin Baoku, et al. Evaluation of land use change of Jungar Banner based on land use transfer matrix[J]. Bulletin of Soi and Water Conservation, 2018, 38(1): 131-134.]

[23] Sharp R, Tallis H, Ricketts T, et al. InVEST 3.2.0 User's Guide, 2015.

[24] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 533-544. [Wang Shaoqiang, Zhou Chenghu, Li Kerang, et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoin in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 533-544.]

[25] 郑拴丽, 许文强, 杨辽, 等. 新疆阿尔泰山森林生态系统碳密度与碳储量估算[J]. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1553-1563. [Zheng Shuanli, Xu Wenqiang, Yang Liao, et al. Carbon density and storage of forest ecosystem in Altay Mountains, Xinjiang[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(9): 1553-1563.]

[26] 张杰, 李敏, 敖子强, 等. 中国西部干旱区土壤有机碳储量估算[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(9): 132-137. [Zhang Jie, Li Ming, Ao Ziqiang, et al. Estimation of soil organic carbon storage of terrestrial ecosystem in arid western China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(9): 132-137.]

[27] 史名杰, 武红旗, 贾宏涛, 等. 基于MCE-CA-Markov和InVEST模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 1010-1019. [Shi Mingjie, Wu Hongqi, Jia Hongtao, et al. Temporal and spatial evolution and prediction of carbon stocks in Yili Valley based on MCE-CA-Markov and InVEST models[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6): 1010-1019.]

[28] 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 基于InVEST模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4052-4065. [Liu Yang, Zhang Jun, Zhou Dongmei, et al. Temporaland spatiavariation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model[J]. Acta Ecalogica Sinica, 2021, 41(10): 4052-4065.]

[29] 张影, 谢余初, 齐姗姗, 等. 基于InVEST模型的甘肃白龙江流域生态系统碳储量及空间格局特征[J]. 资源科学, 2016, 38(8): 1585-1593. [Zhang Ying, Xie Yuchu, Qi Shanshan, et al. Carbon storage and spatial distribution characteristics in the Bailongjiang Watershed in Gansu based on InVEST model[J]. Resources Science, 2016, 38(8): 1585-1593.]

[30] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估——以太行山淇河流域为例[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 446-459. [Zhu Wenbo, Zhang Jingjing, Cui Yaoping,

et al. Assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: A case study in Qihe River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 446-459.]

[31] 刘冠, 李国庆, 李洁, 等. 基于InVEST模型的1999—2016年麻塔流域碳储量变化及空间格局研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 267- 274. [Liu Guan, Li Guoqing, Li Jie, et al. Study on change in carbon storage and its spatial pattern in Mata Watershed from 1999 to 2016 based on InVEST model[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 267-274.]

[32] 王让会, 赵文斐, 彭擎, 等. 气候变化及景观格局与生态系统碳储存的耦合关系——以祁连山为例[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 250-257. [Wang Ranghui, Zhao Wenfei, Peng Qing, et al. The relationship of climate change and landscape pattern with ecosystem carbon storage: A case study from the Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 250-257.]

[33] 卢雅焱, 徐晓亮, 李基才, 等. 基于InVEST模型的新疆天山碳储量时空演变研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1896-1906. [Lu Yayan, Xu Xiaoliang, Li Jicai, et al. Research on the spatio-temporal variation of carbon storage in the Xinjiang Tianshan Mountains based on the InVEST model[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1896-1906.]

[34] 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 等. 退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响——以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(4): 826-844. [Deng Yuanjie, Yao Shunbo, Hou Mengyang, et al. Assessing the effects of the Green for Grain Program on ecosystem carbon storage service by linking the InVEST and FLUS models: A case study of Zichang county in hilly and gully region of Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(4): 826-844.]

[35] 崔晨曦, 孟凡浩, 罗敏, 等. 基于地理探测器的内蒙古耕地水资源短缺时空变化特征及驱动力分析[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(1): 150-161. [Cui Chenxi, Meng Fanhao, Luo Min, et al. Spatio-temporal chane characteristics and driving factors of cultivated land water shortage in inner mongolia based on the geographic detector model[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(1): 150-161.]

[36] 韩春雷. 黄河上游地区耕地时空变化及其对农业水资源的影响[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2021. [Han Chunlei. Spatiotemporal Change of Cultivated Land and Its Impact on Agricultural Water Resources in the Upper Reaches of the Yellow River[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2021.]

[37] 向雁. 东北地区水—耕地—粮食关联研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020. [Xiang Yan. Study on Water- Land- Food (WLF) Nexus in Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy ofAgricultural Sciences Thesis, 2020.]

[38] 程维明, 柴慧霞, 方月, 等. 基于水资源分区和地貌特征的新疆耕地资源变化分析[J]. 自然资源学报, 2012, 27(11): 1809-1822. [Cheng Weiming, Chai Huixia, Fang Yue, et al. Analysis of cultivated land based on water resources regionalization and geomorphologic characteristics in Xinjiang, China[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(11): 1809-1822.]

[39] 郭靖, 王光焰, 徐生武, 等. 水资源管理增强下的塔里木河上中游碳储量动态评估[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 589-599. [Guo Jing, Wang Guangyan, Xu Shengwu, et al. Dynamic assessment of Tarim River carbon storage under enhanced water resources management[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 589-599.]

Effects of human activities on carbon storage in the Irtysh River Basin

ZHANG Xiaomin[1,2], ZHANG Dongmei[1], ZHANG Wei[1]

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Carbon sequestration is among the main functions of terrestrial ecosystem services, and the carbon sequestration capacity of terrestrial ecosystems directly affects global carbon emissions and climate change processes. Human activities directly influence land use and cover change, consequently affecting the carbon sequestration function of ecosystems. The terrestrial ecosystem services in dry and cold regions are more vulnerable and significantly impacted by human activities. Therefore, utilizing land use data from the Irtysh River Basin in the Altai Mountains from 2000 to 2020, the InVEST model was used to estimate and analyze the spatial distribution of carbon stocks in the basin during different periods. Subsequently, the influence of human activities on the spatial distribution of carbon stocks was discussed. The results show the following: (1) The main land use types in the basin are woodland, grassland, and unused land, and the land use pattern changed significantly from 2000 to 2020. Cultivated land, urban and rural land, industrial and mining land, and residential land expanded continuously, increasing by 2619.35 km^2 and 186.68 km^2, respectively. Grassland and water areas initially decreased and then expanded, increasing by 4725.13 km^2 and 33.47 km^2, respectively. Meanwhile, forest land and unused land decreased continuously by 2328.88 km^2 and 5237.76 km^2, respectively. (2) During this period, the spatial distribution pattern of carbon stocks in the basin was similar and showed a zonal distribution. High-value areas were distributed in high-altitude regions where grassland and woodland were clustered, while low-value areas were distributed in low-altitude regions where unused land was clustered. In 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 the total carbon storage in the basin was 641.60 Tg, 645.78 Tg, 646.83 Tg, 650.28 Tg, and 665.91 Tg, respectively , with an annual growth rate of 0.95%, showing an upward trend. (3) The areas in the basin where carbon storage decreased or increased showed a spot-like distribution. Furthermore, carbon storage reduction mainly occurred through the conversion of grassland to unused land and cultivated land, with an average annual reduction of 58.81 Tg. The increase in carbon storage primarily resulted from the conversion of unused land into cultivated land and grassland, with an average annual increase of 64.82 Tg. From 2000 to 2020, the net sequestration of carbon storage exceeded the net release, indicating an increasing carbon sequestration capacity in the Irtysh River Basin. Overall, the reclamation of land and grass due to human activities is the main reason for the increase in carbon storage in the basin. However, it is necessary to coordinate the development and utilization of water and soil resources, as this will guarantee not only an increased carbon sink but also the preservation of the carrying capacity of water and soil resources, ultimately achieving sustainable economic development in the Irtysh River Basin. The results of this study will help to promote the carbon cycle of the basin and the carbon sequestration capacity of the ecosystem, as well as provide a scientific basis for the establishment and management of the basin carbon pool.

Keywords: human activities; carbon storage; LUCC; InVEST model; Irtysh River Basin